

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Горловой Дианы Алексеевны

«Ускорение электронов и вторичные процессы при взаимодействии лазерного импульса релятивистской интенсивности со слоем подкритической плазмы», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

В настоящее время лазерные системы позволяют генерировать фемтосекундные лазерные импульсы, которые при фокусировке обеспечивают достижение релятивистских интенсивностей (свыше 10^{18} Вт/см²). Воздействие таких импульсов на мишени приводит к полной ионизации атомов и формированию лазерной плазмы. Помимо этого взаимодействие лазерного импульса с электронной компонентой образовавшейся плазмы приводит к формированию ускоренного пучка электронов. Лазерные методы ускорения электронов имеют свои преимущества перед традиционными и ряд важных приложений в физике. В частности, в данной работе рассматриваются источник нейтронов на основе реакций фоторасщепления и источник терагерцового излучения.

При практическом использовании ускоренных пучков электронов к их характеристикам предъявляются определенные требования, такие как минимизация угловой расходимости, по возможности узкий спектр энергий электронов, повышение электрического заряда, переносимого сгустком и т.п. Поэтому исследования, направленные на улучшение характеристик ускоренных пучков электронов представляют интерес, а тема диссертационной работы является **актуальной и имеет важные практические приложения.**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Во **введении** излагается актуальность исследования, степень разработанности

темы, сформулированы цели и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология исследования, защищаемые положения, обоснования достоверности полученных результатов. Приводятся список публикаций, в которых отражены основные результаты диссертации, сведения об апробации и личный вклад автора.

Первая глава посвящена описанию экспериментальных и численных методов исследования релятивистской лазерной плазмы, выполненных соискателем. Приводится схема и описание экспериментальной установки, описание мишени и методов создания плазмы с подкритической плотностью, описание детекторов, измерительных методик и других элементов экспериментальной установки. Излагаются основы и детали используемого PIC метода численного моделирования физических процессов в лазерной плазме. Проводится тестирование численной модели сравнением различных схем численного решения уравнений Максвелла, обоснование приближения неподвижных ионов. Излагаются детали постобработки полученных численных данных (разложение полей на потенциальную и вихревую составляющие, вычисление работ этих составляющих электрического поля над ускоренными электронами) для выявления отдельных физических механизмов, ответственных за ускорение электронов.

Оригинальные результаты изложены, в основном, во второй и третьей главе диссертации. **Вторая глава** посвящена исследованию ускорения электронов при воздействии фемтосекундного лазерного импульса релятивистской интенсивности на слой подкритической плазмы. В начале главы излагаются основные механизмы инжекции электронов и их ускорения. Далее приводятся результаты экспериментальных и численных исследований ускорения электронов взаимно дополняя друг друга. Экспериментально были получены пучки электронов с энергией единицы МэВ, с угловой шириной 0.1-0.2 рад и экспоненциальным энергетическим спектром с «температурой»

порядка 2 МэВ. Заряд сгустка составлял 40 пКл. В целом результаты численного исследования соответствуют экспериментальным. По анализу траекторий крупных частиц диссертантом были выявлены механизмы инжекции электронов в область ускоряющего поля. Установлено, что определяющим фактором реализации того или иного механизма является начальная плотность мишени (варьировалась за счет задержки фемтосекундного импульса по отношению к предимпульсу). При высокой начальной плотности (электронная концентрация порядка 0.2 от критической) доминирующей является инжекция в результате распада плазменных волн. При понижении начальной концентрации до значения 0.1 от критической роль ионизационной инжекции повышалась и становилась определяющей. По анализу вклада в работу над ускоренными электронами потенциальной и вихревой компонент электрического поля был установлен механизм ускорения электронов. При высокой начальной плотности мишени набор энергии электронами происходит в основном за счет прямого лазерного ускорения. При более низкой начальной концентрации электронов – за счет самомодулированного кильватерного ускорения. В этой же главе предлагается в качестве приложения реализованного источника электронов создание источника нейтронов на основе реакций фоторасщепления. Был получен поток нейтронов 10^5 ед / (с срад) при эффективности 10^6 нейтронов / Дж лазерного излучения.

Еще одному приложению – созданию источника терагерцового излучения на основе лазерно-плазменного взаимодействия посвящена **третья глава** диссертации. В режиме наилучшей генерации терагерцового излучения удалось получить полную энергию на детекторе несколько десятков мкДж, при этом рассчитано, что энергия в спектральном диапазоне 0.5-5 ТГц в отсутствие ослабления выходным окном составила бы 0.1 мДж или 0.2% от энергии лазерного импульса. Увеличение энергии лазерного импульса приводит к линейному увеличению энергии терагерцового излучения. На основе анализа характеристик терагерцового излучения автор делает вывод,

что физический механизм, ответственный за генерацию - когерентное переходное излучение ускоренных электронов, пересекающих границу плазма-вакуум. Численное исследование проводилось в основном на базе модельных формул в виду вычислительных сложностей РС метода в рассматриваемой постановке.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В диссертационной работе используются апробированные экспериментальные методики и расчетные пакеты. Проводится сопоставление экспериментальных и теоретических результатов, причем эти результаты достаточно хорошо согласуются между собой. Автор достаточно подробно проводит обоснование используемых приближений (неподвижные ионы, использование соотношений для переходного излучения на резкой границе раздела двух сред и т.п.), приводя соответствующие оценки. Результаты численного расчета тестируются на различных схемах решения уравнений Максвелла и модельных задачах. Все это позволяет считать результаты работы **достоверными**, а выводы диссертации **обоснованными**.

Новизна защищаемых положений и выводов, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений. Результаты достаточно полно опубликованы в 7 статьях в журналах, входящих в международные базы данных. Работа прошла широкую апробацию на российских и международных конференциях и семинарах.

По работе имеется ряд замечаний:

- В работе присутствует ряд не поясненных терминов. Например, на рис. 1.2б показана зависимость *плотности вероятности* как функция смещения поверхности пленки. Что при этом имеется в виду под плотностью вероятности не указано (относительная частота с которой обнаруживалось смещение пленки на соответствующую величину?).

- Присутствуют опечатки в уравнениях (хотя они и не затрудняют их понимание), поочередно используется написание формул то в системе СИ, то в СГС.
- Указано, что при проведении 3D расчетов методом PIC использовалась только одна частица в ячейке. Мне представляется, что это слишком мало, несмотря на наличие вычислительных сложностей в трехмерных расчетах. Также в формуле (1.3) присутствует функция обозначающая форму крупной частицы, при этом нигде не указано какой формы выбирались крупные частицы.
- На мой взгляд недостаточно четко описана интерпретация возникающего терагерцового излучения как переходного излучения на границе плазма – вакуум. При прочтении остаются вопросы насколько быстро движется граница плазма – вакуум и является ли это движение существенным для расчета. Хотелось бы видеть оценки, как это было сделано для обоснования других приближений. Кроме того, непонятно почему плазма с сильно сверхкритической плотностью для терагерцового излучения интерпретируется как среда с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 0$?

Указанные замечания не носят принципиального характера.

Характеризуя диссертацию в целом, хочу отметить, что она выполнена на весьма высоком научном уровне. При этом диссертант проявила себя исследователем, способным анализировать и находить подходы к решению сложных проблем. Содержание диссертационной работы соответствует указанной специальности 1.3.19. Лазерная физика. Содержание основных положений диссертации и другие необходимые сведения в целом достаточно полно отражены в автореферате. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи –

развития методов ускорения электронов при фемтосекундном лазерном воздействии на плазму и их применение для целей ядерной фотоники и генерации терагерцового излучения, имеющей значение для развития физики лазерно-плазменного взаимодействия.

Диссертация Горловой Дианы Алексеевны «Ускорение электронов и вторичные процессы при взаимодействии лазерного импульса релятивистской интенсивности со слоем подкритической плазмы» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Доцент кафедры физической электроники физического факультета МГУ,
к.ф.-м.н. И.Н.Карташов

Почтовый адрес:

119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2, физический факультет
МГУ

Телефон: +7 495 939 2547

E-mail: igorkartashov@physics.msu.ru

Подпись И.Н.Карташова заверяю.